

УДК 532.731-1

EDN: WGQSIG

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-323-332>



Оригинальная статья

Влияние ультразвука и температуры на межфазную поверхность в высоковязких жидкостях

Иван Александрович Маняхин✉, Роман Николаевич Голых,
Владимир Николаевич Хмельёв, Александр Романович Барсуков

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «АлтайГТУ им. И.И. Ползунова»,
ул. Трофимова, 27, г. Бийск, 659305, Российская Федерация
✉manyakhin.ivan@bk.ru

Аннотация

Проблема повышения скорости растворения газов в жидкостях является ключевой для многих отраслей – от химической технологии и очистки сточных вод до пищевой промышленности (газирование напитков) и медицины (кислородная терапия). Цель исследования – определить, какие подходы и принципы организации массообменных процессов поглощения газов жидкостями с помощью ультразвука являются наиболее эффективными для создания промышленных систем газонасыщения. В рамках исследования разработан метод управления структурой межфазной границы жидкость–газ. Для исследования процесса поглощения газов жидкостями был разработан лабораторный стенд, способный поддерживать стабильную температуру жидкодисперсной системы жидкость–воздух. С ростом температуры жидкости, представляющей собой водно-глицериновый раствор, с 18 до 60 °С увеличивается предельная вязкость, при которой формируются капиллярные волны на поверхности межфазной границы жидкость–газ. При повышенной температуре рост числа возмущений на межфазной поверхности барботажного пузырька наблюдается в жидкости при динамической вязкости до 41 мПа·с. В качестве приоритета дальнейших исследований выступает уточнение оптимальных температурных режимов для высоковязких жидкостей (нефть, моторные масла, эпоксидные смолы), полимерных расплавов и газов (озон, углекислый газ) на основе полученных данных для водно-глицериновых смесей. Разработанный метод, основанный на применении высокоинтенсивного ультразвука в сочетании с оптимизацией температуры процесса, позволяет существенно снизить энергозатраты на процесс растворения газов в жидкостях. Данное решение особенно актуально для изолированных энергодефицитных территорий, в том числе арктических районов Республики Саха (Якутия), и способствует повышению экономической эффективности и экологической безопасности подобных производств.

Ключевые слова: ультразвук, лабораторный стенд, температура, кавитация, барботаж, вязкость жидкости
Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта «Выявление условий и режимов кавитационного взаимодействия жидких сред с газами», № 23-12-00278.

Для цитирования: Маняхин И.А., Голых Р.Н., Хмельёв В.Н., Барсуков А.Р. Влияние ультразвука и температуры на межфазную поверхность в высоковязких жидкостях. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(2):323–332. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-323-332> EDN: WGQSIG

Original article

Influence of ultrasound and temperature on the interfacial surface in highly viscous liquids

Ivan A. Manyakhin✉, Roman N. Golykh, Vladimir N. Khmelev, Aleksandr R. Barsukov

Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University,
Biysk, 27, Trofimova St., Russian Federation, 659305
✉manyakhin.ivan@bk.ru

Abstract

Increasing the rate of gas dissolution in liquids is a critical priority for many industries, from chemical engineering and wastewater treatment to the food industry (e.g., beverage carbonation) and medicine (e.g., oxygen therapy). This study aimed to identify which approaches and principles for organizing mass transfer processes during gas absorption by

liquids using ultrasound are most effective for creating industrial gas saturation systems. As part of this work, a method for controlling the liquid–gas interface structure was developed. To study the gas absorption process, a laboratory setup capable of maintaining a stable temperature of a liquid–air dispersed system was also developed. When the temperature of a water–glycerin solution increases from 18 °C to 60 °C, the limiting viscosity at which capillary waves form on the liquid–gas interface increases. At elevated temperatures, an increase in the number of disturbances on the interphase surface of a bubbling bubble is observed in liquids with a dynamic viscosity of up to 41 mPa·s. Further research aims to refine the optimal temperature regimes for highly viscous liquids (oil, motor oils, epoxy resins), polymer melts, and gases (ozone, carbon dioxide) based on these findings for water–glycerin mixtures. The results have high practical significance, as the developed method–based on high-intensity ultrasound combined with process temperature optimization–significantly reduces energy consumption for dissolving gases in liquids. This is particularly relevant for isolated energy-deficient areas, including the Arctic regions of the Republic of Sakha (Yakutia), and contributes to increased economic efficiency and environmental safety of such production.

Keywords: ultrasound, laboratory stand, temperature, cavitation, bubbling, liquid viscosity

Funding. This research was supported by the Russian Science Foundation for the project “Evaluation of conditions and modes of cavitation interaction of liquid media with gases”, No. 23-12-00278.

For citation: Manyakhin I.A., Golykh R.N., Khmelev V.N., Barsukov A.R. Influence of ultrasound and temperature on the interfacial surface in highly viscous liquids. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(2):323–332. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-323-332> EDN: WGQSIG

Введение

В настоящей статье проводится описание решений для интенсификации процесса поглощения газов жидкостями и жидкодисперсными системами с помощью ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Практически все известные процессы, основанные на поглощении газов жидкостями [1–5], могут быть интенсифицированы ультразвуковыми колебаниями [6–9]. Цель исследования – определить, какие подходы и принципы организации массообменных процессов поглощения газов жидкостями с помощью ультразвука являются наиболее эффективными для создания промышленных систем газонасыщения жидкостей. Представленные в данной статье экспериментальные результаты имеют фундаментальную значимость для продвижения в понимании механизмов процессов поглощения газов различными высоковязкими жидкостями и позволяют создать энергоэффективные способы насыщения газами жидкостей и жидкодисперсных сред посредством ультразвуковых колебаний.

Разработанный стенд для проведения экспериментальных исследований, основанный на действии ультразвуковых колебаний, ход проведения экспериментов и получившиеся данные описаны в следующих разделах.

Материалы и методы

Ультразвуковое воздействие на жидкости и жидкодисперсные системы тесно связано с явлением акустической кавитации, в ходе которого в сплошной жидкой фазе образуются газовые микропузырьки. Парогазовые области зарождаются на участках жидкости с пониженным дав-

лением (в фазе разрежения) и схлопываются при повышенном давлении (в фазе сжатия). Интенсивность кавитации напрямую зависит от мощности ультразвукового излучения. Различают четыре основных режима кавитации: докавитационный, пороговый, развитый и вырожденный.

Стабильный докавитационный режим сохраняется в воде при интенсивности ультразвукового излучения порядка 0,3–0,5 Вт/см². Для возникновения развитой кавитации необходимо преодолеть пороговую интенсивность, которая для воды составляет 1–2 Вт/см², для моторных масел – 3–8 Вт/см², а для эпоксидных смол может достигать 30–40 Вт/см² [10]. При развитом режиме кавитации в жидкости формируются ансамбли кавитационных пузырьков. Они зарождаются вблизи ультразвукового излучателя, где уровень акустического давления в фазе схлопывания максимален, и затем уносятся потоком прочь от излучающей поверхности. При вырожденной кавитации образуются парогазовые области, которые не схлопываются в течение длительного времени. Это наблюдается при избыточной интенсивности ультразвуковых колебаний: чем выше мощность излучения, тем больше область вырожденной кавитации.

Для реализации процесса насыщения жидкостей газом необходимо поддерживать оптимальные кавитационный и температурный режимы. Механизм интенсификации поглощения газов жидкостями под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности заключается во взаимодействии крупных барботажных пузырьков и ударных волн, образующихся при схлопывании кавитационных микропузырьков. Барбо-

тажные пузырьки принудительно подаются в жидкую фазу (рис. 1). Их размер составляет 2 мм и более, что многократно превышает размер кавитационных пузырьков (20–100 мкм).

Под воздействием ультразвука на поверхности инъекционных пузырьков (на границе раздела фаз газ–жидкость) возникают возмущения – капиллярные волны амплитудой 100–150 мкм. Рябь на границе раздела фаз может переходить в более крупные или более мелкие волны путем нелинейной интерференции, а также при увеличении скорости потока кавитационных пузырьков [11]. Поверхностное натяжение жидкости стремится стабилизировать поверхность образовавшихся крупных волн и препятствует диспергированию всего барботажного пузырька. Напротив, ударные волны от ультразвукового излучателя приводят к возникновению гидродинамических сил, которые вызывают искажения границы жидкость–газ.

Для исследования влияния вязкости гетерогенной системы вода–глицерин на площадь удельной поверхности на границе раздела фаз жидкость–газ для барботажных пузырьков был разработан специализированный лабораторный стенд. Данные о температуре жидкости записываются с серии независимых термодпар, которые могут быть размещены случайным образом в технологическом объеме для ультразвуковой обработки жидкодисперсных систем различной начальной вязкости. Температурные данные хранятся в файловой системе персонального компьютера в виде текстового документа с таблицей, где первый столбец – метка времени, а остальные четыре столбца являются температурными показаниями с термодатчиков.

Ультразвуковое воздействие осуществляется на частоте 21–23 кГц. Для поддержания резонансного режима работы ультразвуковой колебательной системы используется система фазовой автоподстройки частоты генератора, которая в режиме реального времени компенсирует изменения акустической нагрузки и температуры обрабатываемой среды. Максимальная активная мощность ультразвукового генератора при работе с водно-глицериновым раствором составляет не менее 750 Вт при температуре 20 °С и объеме облучаемой гетерогенной системы 1300 мл.

Для регистрации динамики барботажных пузырьков и кавитационных процессов используется высокоскоростная камера Photron FASTCAM SA-Z (модель 2100K) в комплектации лабораторного стенда, обеспечивающей ча-

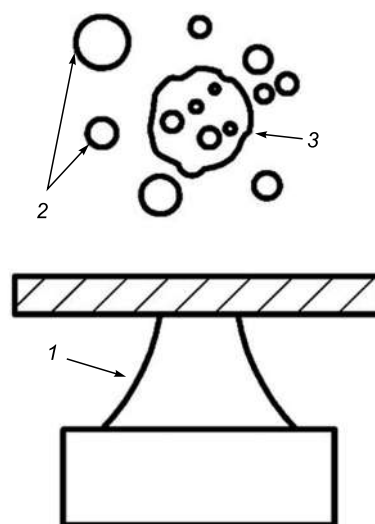


Рис. 1. Динамика межфазной поверхности при ультразвуковом воздействии: 1 – ультразвуковой излучатель, 2 – кавитационные пузыри, 3 – барботажный пузырь

Fig. 1. Dynamics of the interfacial surface under ultrasonic exposure: 1 – ultrasonic emitter, 2 – cavitation bubbles, 3 – bubbling bubble

стоту съемки до 2 000 000 кадров в секунду. В ходе экспериментов съемка проводилась с частотой 210 000 кадров в секунду при разрешении 380 × 160 пикселей, что позволило детально определить форму и траекторию движения пузырьков. Благодаря использованию сверхмакрообъектива Laowa 60 mm f/2.8 2X Ultra-Macro был достигнут масштаб изображения до 3 мкм на пиксель, что дало возможность наблюдать капиллярные волны на поверхности пузырьков. Выдержка электронного затвора (1 мкс) камеры позволила зафиксировать изменение межфазной поверхности без смазывания в течение одного периода колебаний ультразвукового излучателя (43–48 мкс). Высокая светочувствительность обеспечивает качественную съемку при рабочем уровне освещенности 400 лм. Камера поддерживает внешний запуск по таймеру, что позволило синхронизировать начало съемки с моментом включения ультразвукового генератора при проведении экспериментов.

Для управления параметрами работы лабораторного стенда разработан графический интерфейс оператора, который позволяет задавать: длительность ультразвукового воздействия, время включения камеры, задержки включения и выключения ультразвука, а также имя файла для записи показаний термодпар. Лабораторный стенд оснащен функцией аварийного перезапуска. Пред-

усмотрено два способа перезагрузки системы: аппаратный (кнопка сброса на плате контроллера) и программный (кнопка «Остановить» на экране оператора).

Раствор воды и глицерина является оптимальным выбором для видеосъемки, так как полученная в ходе смешивания смесь является оптически прозрачной, плотности воды и глицерина при нормальных условиях составляют 1 и 1,26 г/см³ соответственно (различаясь не более чем на 26 %), а поверхностные натяжения равны 72 и 68 мН/м (разница не более 6 %). При этом наблюдается существенная зависимость вязкости от массовой доли глицерина (вязкость воды при нормальных условиях – около 1 мПа·с, а вязкость 80%-го раствора глицерина при температуре 20 °С составляет 41,2 мПа·с).

Первоначально была выявлена зависимость площади межфазной поверхности между газовой и жидкой фазами в системе глицерин–вода–воздух от интенсивности ультразвукового излучения. В ходе экспериментального исследования установлено, что существует предельная вязкость, при которой межфазная поверхность в системе жидкость–газ максимальна [12]; при этом площадь поверхности барботажного пузырька на 70 % превышает исходную (рис. 2 приведен для водной среды, имеющей вязкость не более 1 мПа·с).

При вязкости 12 мПа·с существенного относительного прироста межфазной поверхности в ходе экспериментов не наблюдается [12]. Поэтому было предложено дополнительно изме-

нять температурный режим для снижения вязкости жидкости. Повышение температуры, с одной стороны, уменьшает вязкость среды, но с другой – снижает интенсивность ультразвуковой кавитации [13]. Кроме того, с ростом температуры ухудшается растворимость газов в высоковязких жидкостях, например в нефти [14].

Проведено исследование динамики межфазной поверхности в зависимости от температуры с целью определения оптимальных температурных режимов при непрерывном ультразвуковом воздействии. Исходная конфигурация лабораторной установки не позволяла проводить эксперименты при различных температурах жидкодисперсной среды, в связи с чем была разработана модифицированная версия лабораторного стенда (рис. 3). В состав установки дополнительно введены термокамера и блок терморегуляции; регистрация процессов осуществлялась методом высокоскоростной видеосъемки через оптически прозрачную стенку термокамеры.

Корпус термокамеры выполнен из стали, что обеспечивает высокую конструкционную прочность. Его стенки окрашены черной матовой краской для защиты от коррозии, а также для устранения бликов от отражающей поверхности, что необходимо для предотвращения засветки макрообъектива высокоскоростной камеры внешними источниками света. Подача нагретого воздуха в термокамеру осуществляется через алюминиевый рукав. В качестве нагревателя воздуха используется электрическая теплушка ТЭП-5000K1. Номинальная мощность теплушки составляет 5 кВт, однако для снижения тепловой нагрузки один из ТЭНов был аппаратно отключен, в результате чего рабочая мощность снизилась до 2,5 кВт. Штатный вентилятор заменен на регулируемый, питание которого осуществляется от лабораторного блока питания, что позволяет изменять скорость воздушного потока. Для контроля температуры воздуха в термокамере применяется микропроцессорный терморегулятор TRM-10.

Терморегулятор TRM-10 оснащен встроенной термопарой, которая может крепиться к корпусу термокамеры или размещаться непосредственно в рабочем объеме. Для экспериментов с высоковязкими жидкостями используется штатная термопара, стабильно работающая в диапазоне температур 10–70 °С. Данный температурный диапазон оптимален для обработки жидкостей, поскольку

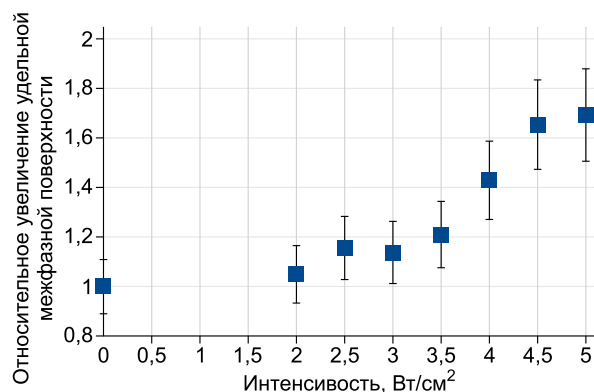


Рис. 2. Зависимость удельной площади межфазной поверхности в системе жидкость–газ от интенсивности ультразвукового воздействия

Fig. 2. Dependence of the specific area of the interphase surface in the liquid–gas system on the propagation of ultrasonic action

при более высоких температурах возникает риск перегрева ультразвукового излучателя, что приводит к нестабильности его работы. Для устранения этой проблемы требуется усложнение конструкции рабочего инструмента, например, добавление системы охлаждения или изоляция излучателя от нагретой зоны, в том числе за счет бесконтактного ультразвукового воздействия. При более низких температурах наблюдается повышенное энергопотребление генератора, обусловленное высокой вязкостью обрабатываемой среды.

При исследованиях расплавов полимеров, требующих температур 100–400 °С [15], штатная термопара может быть заменена на термодатчик ТСП Pt50. Данный датчик позволяет измерять температуру до 850 °С, что значительно расширяет функциональные возможности лабораторного стенда.

Для вычисления площади удельной межфазной поверхности по полученным изображениям была разработана специализированная программа [16]. Алгоритм ее работы основан на определении длины контура проекции изображения пузырька [16].

Далее приведены результаты экспериментальных исследований влияния температуры на увеличение площади межфазной поверхности.

Результаты и обсуждение

В термокамере в ходе экспериментов поддерживалась стабильная температура облучаемой жидкодисперсной среды в диапазоне от 18 до 60 °С. Эксперименты показали, что с ростом температуры увеличивается предельная вязкость, при которой на поверхности барботажного пузырька наблюдается формирование поверхностных волн. На рис. 4 представлены результаты высокоскоростной видеосъемки барботажных пузырьков при концентрации глицерина от 0 до 80 %.

Результаты высокоскоростной съемки барботажных пузырьков при массовой доле глицерина 70 и 80 % показали, что повышение температуры приводит к появлению капиллярных волн на пузырьках в водно-глицериновом растворе (рис. 5). Если при 18,5 °С поверхность гладкая, то при 39 °С на ней появляется рябь, которая усиливается к 57,7 °С. Капиллярные волны образуются на барботажном пузырьке в жидкости даже при вязкости 41 мПа·с.

При содержании глицерина 80 %, температуре 57,7 °С и ультразвуковом воздействии относительное увеличение межфазной поверхности на

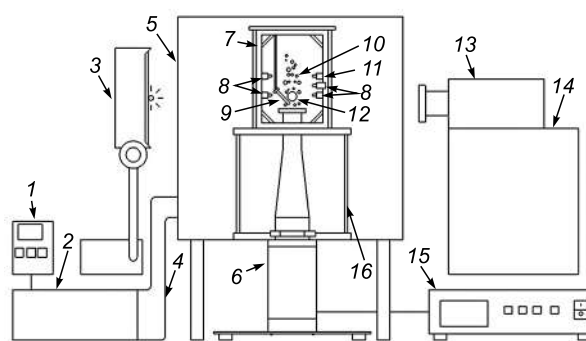


Рис. 3. Схема лабораторного стенда для исследования влияния температурных режимов и ультразвуковых колебаний на формирование межфазной поверхности: 1 – ТРМ-10, 2 – тепловыпуск, 3 – прожектор, 4 – воздуховод, 5 – термокамера, 6 – УЗКС, 7 – держатель, 8 – измерительные термопары, 9 – инжекционный канал, 10 – кавитационный канал, 11 – термопара (ТРМ-10), 12 – барботажный пузырь, 13 – высокоскоростная камера, 14 – подставка для камеры, 15 – электронный генератор, 16 – технологический объем

Fig. 3. Schematic diagram of the laboratory setup for studying the influence of temperature conditions and ultrasonic vibrations on the interfacial surface: 1 – TRM-10, 2 – heat gun, 3 – spotlight, 4 – air duct, 5 – heat chamber, 6 – ultrasonic vibrating system, 7 – stand, 8 – measuring thermocouples, 9 – injection channel, 10 – cavitation channel, 11 – thermocouple (TRM-10), 12 – bubbling bubble, 13 – main chamber, 14 – stand for the camera, 15 – electronic generator, 16 – process volume

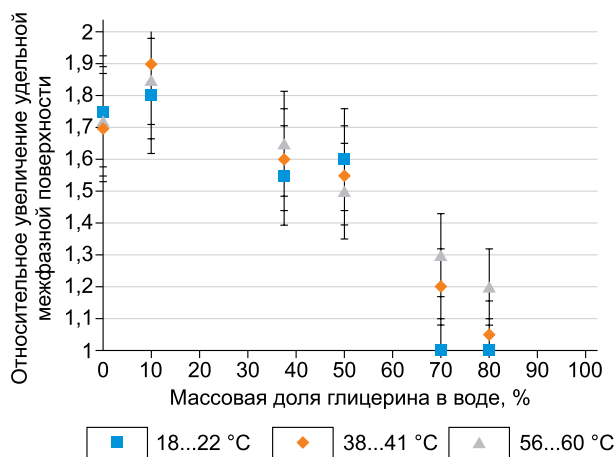


Рис. 4. Зависимость относительной удельной поверхности межфазной поверхности от температуры жидкодисперсной системы

Fig. 4. Dependence of the relative specific surface area of the interphase surface on the temperature of the liquid-dispersed system

границе раздела фаз жидкость–газ составило 20 % от исходной. При массовой доле глицерина 37,5 % в диапазоне температур от 18 до 60 °С прирост межфазной поверхности достигал 55–60 %. Мак-

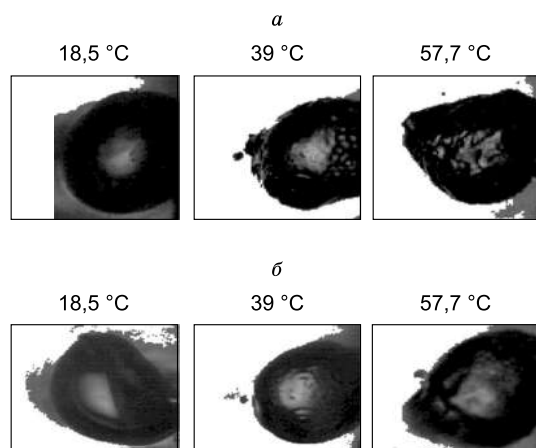


Рис. 5. Результаты съемки межфазной поверхности при массовой доле глицерина 70 (а) и 80 % (б)

Fig. 5. Results of visualization of the interfacial surface with a mass fraction of glycerol of 70% (a) and 80% (b)

симальное увеличение площади барботажного пузырька (более чем на 90 %) зафиксировано для 10%-го раствора глицерина при температуре 39 °C и высокоинтенсивном ультразвуковом воздействии.

Таким образом, при повышении температуры до 55...60 °C и ультразвуковом воздействии предельная вязкость жидкодисперсной системы может быть увеличена в 5,5 раза (до 41 мПа·с) по сравнению с результатами, полученными авторами при 20 °C (7,4 мПа·с).

Полученные в ходе исследовательской работы зависимости носят не частный, а общий характер, поскольку они обусловлены фундаментальными физическими механизмами, не зависящими от химической природы жидкой среды. Ключевыми механизмами, определяющими рост межфазной поверхности, являются генерация капиллярных волн на границе раздела фаз и развитие кавитационных явлений в объеме жидкости под действием ультразвукового поля. Данные явления имеют универсальную физическую природу и наблюдаются в широком классе ньютоновских и неньютоновских жидкостей при достижении пороговых значений интенсивности ультразвука и соответствующих реологических параметров среды.

Выявленная закономерность увеличения площади межфазной поверхности с ростом температуры справедлива для любых жидких сред, удовлетворяющих двум основным условиям. Во-первых, вязкость среды должна снижаться при нагреве. Это свойство присуще практически всем жидкостям, независимо от того, состоят ли

они из низкомолекулярных или высокомолекулярных соединений. Во-вторых, величина поверхностного натяжения должна оставаться достаточной для существования и распространения капиллярных волн на границе раздела с газовой фазой. Данное условие выполняется для всех жидкостей, находящихся вдали от критической точки фазового перехода жидкость–пар. Например, для воды критическая температура составляет 374 °C, а критическое давление – 22,1 МПа; исследованный в работе диапазон температур 18–60 °C лежит значительно ниже этой границы, что гарантирует наличие устойчивой межфазной границы и конечных значений поверхностного натяжения (для чистой воды при 20 °C оно составляет 0,072 Н/м, для глицерина – 0,068 Н/м). Описанные условия применимы не только к исследованной системе вода–глицерин, но и ко многим другим технически важным жидкостям: нефти и нефтепродуктам, моторным маслам, эпоксидным и полиэфирным смолам, а также к расплавам полимеров (полиэтилен, полипропилен). Общая закономерность остается неизменной: повышение температуры снижает вязкость, а ультразвук увеличивает площадь межфазной поверхности. Однако количественные параметры, например, при какой именно вязкости начинается эффект или какая температура является оптимальной, могут различаться в зависимости от свойств конкретной жидкости (ее текучести и того, как она взаимодействует с ультразвуком).

При переходе от лабораторной к промышленным барботажным установкам следует учитывать эффект масштабирования, который будет проявляться в изменении соотношения объемных и поверхностных сил, а также в трансформации гидродинамической структуры потоков. Увеличение линейных размеров рабочей камеры и, соответственно, ее объема приведет к необходимости пересмотра энергетических параметров ультразвукового воздействия. Для сохранения неизменной интенсивности ультразвука $I = P/S$ (где P – акустическая мощность, S – площадь излучающей поверхности) в зоне барботажа требуется пропорциональное увеличение подводимой акустической мощности. В реальных условиях линейная зависимость соблюдается только приближенно: при увеличении объема возрастают потери на затухание ультразвука и усиливается рассеяние волн на неоднородностях среды.

Ключевым условием эффективности процесса является превышение порога кавитации – минимальной интенсивности ультразвука, при которой в жидкости начинают образовываться кавитационные полости. Важно отметить, что данное пороговое значение может быть достигнуто при меньших удельных затратах энергии (в расчете на единицу объема) за счет оптимизации пространственного распределения акустического поля. Перспективным техническим решением является использование многолучевых ультразвуковых излучателей с фазированной решеткой. Такая конструкция позволяет формировать интерференционную картину с локальными областями повышенной интенсивности в зонах наиболее активного барботажа. Данный подход потенциально обеспечивает снижение энергопотребления по сравнению с однолучевыми системами при сохранении требуемого кавитационного режима, однако требует детального исследования [17, 18].

При увеличении масштаба установки существенно возрастает роль конвективных потоков, вызванных как градиентами температуры, так и самим процессом барботажа. В лабораторном стенде эти потоки в значительной степени компенсировались за счет температурной стратификации – устойчивого вертикального распределения температуры, при котором теплая жидкость остается сверху, а холодная внизу, что подавляет крупномасштабное перемешивание. Следует подчеркнуть, что в проведенных экспериментах объем жидкости или жидкодисперсной смеси составлял всего 1300 мл, поэтому влияние конвективных потоков на исследуемые процессы было незначительным и не могло существенно исказить полученные результаты. Важно также отметить, что конструкция технологического объема лабораторного стенда включала перегородку, разделяющую верхний и нижний резервуары, вследствие чего ультразвуковое воздействие было локализовано преимущественно в верхнем резервуаре. Это обеспечивало четкую фокусировку акустического поля на исследуемой области и минимизировало неконтролируемое влияние на нижележащие слои жидкости. Однако при переходе к промышленным объемам такая компенсация может оказаться недостаточной, поскольку теплые и холодные слои жидкости начинают активно перемешиваться и конвекция становится неуправляемой [19]. Следует также отметить,

что дополнительное наложение ультразвукового поля способно влиять на структуру течения: формирующиеся ансамбли кавитационных пузырьков интенсифицируют микроперемешивание и могут модифицировать крупномасштабные конвективные потоки, однако количественная оценка этого эффекта при масштабировании требует отдельных исследований [20–22]. В любом случае для сохранения контролируемой гидродинамической обстановки в промышленном аппарате потребуется либо активное управление температурными полями (например, локальный нагрев или охлаждение для гашения нежелательных потоков), либо установка дополнительных гидродинамических стабилизаторов, таких как перфорированные перегородки, которые разделяют большой объем на отдельные зоны и тем самым упорядочивают движение жидкости [23].

Дополнительный фактор, влияющий на масштабирование, – неравномерность распределения кавитации в объеме жидкости.

Главной задачей при масштабировании процесса является обеспечение наличия схлопывающихся кавитационных пузырьков вблизи барботажных пузырьков. Этого возможно достичь с использованием излучателей с развитой поверхностью излучения или пластинчатых отражателей.

Таким образом, предложенный в рамках настоящего исследования метод может быть эффективно применен в промышленных масштабах при соблюдении двух ключевых условий. Во-первых, интенсивность ультразвука в рабочей зоне должна быть достаточной для возникновения кавитации. Во-вторых, необходимо обеспечить организацию потоков жидкости и газа таким образом, чтобы исключить образование застойных зон и гарантировать равномерное распределение газовой фазы по всему технологическому объему барботажного аппарата.

Заключение

В ходе проведения исследования был разработан принципиально новый подход к формированию межфазной поверхности в высоковязких жидкостях, граничащих с газовой фазой. Подход основан на совместной реализации высокоразвитой ультразвуковой кавитации и оптимизации температурного режима. Создан лабораторный стенд для исследования совместного влияния режимов ультразвукового воздействия и темпе-

ратуры на формирование межфазной поверхности газ–жидкость. Установлена возможность формирования межфазной поверхности для жидкости повышенной вязкости при наличии взаимоисключающих факторов, таких как снижение вязкости среды с одновременным снижением степени развитости кавитации при повышении температуры. При повышении температуры жидкости с 18 до 60 °С предельная вязкость возрастает, и капиллярные волны формируются на барботажном пузырьке в жидкости даже при значении динамической вязкости 41 мПа·с.

Полученные в ходе исследования данные представляют большую ценность для промышленности. Растворение газов в жидкостях является энергозатратным процессом. Использование высокоинтенсивного ультразвука может значительно снизить затраты электроэнергии, что актуально для изолированных энергодефицитных территорий, включая арктические районы Республики Саха (Якутия).

Дальнейшие исследования будут направлены на создание технологического оборудования, принцип работы которого основан на выявленных в ходе экспериментов закономерностях. Будут исследоваться модулированные по амплитуде режимы ультразвукового воздействия. На данный момент получены экспериментальные данные об оптимальных температурных режимах для водоглицериновой смеси, целью дальнейших экспериментальных исследований является определение более точных температурных режимов для других высоковязких жидкостей – нефти, моторных масел, эпоксидной смолы, расплавов полимеров, а также при различных газах, таких как озон и углекислый газ.

Список литературы / References

1. Lei R., Shi Y., Wang X., et al. Water purification system based on self-powered ozone production. *Nano Energy*. 2021; 88:106230. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106230>
2. Патент № 2736461 Российская Федерация, МПК C01D 7/00, C01D 7/12. Способ получения кальцинированной соды из природного содосодержащего сырья : № 2020111749 : заявл. 20.03.2020 : опубл. 17.11.2020 / Неведов Р.А., Орлов В.В., Медведев Р. и др. 11 с.
Patent No. 2736461, Russian Federation, IPC C01D 7/00, C01D 7/12. Method for producing soda ash from natural soda-containing raw materials : No. 2020111749; registered 20.03.2020; published 17.11.2020 / Nefedov R.A., Orlov V.V., Medvedev R., et al. 11 p.
3. Korkut I., Civas A., Bayramoglu M. Effects of ultrasound and process parameters on the precipitation of CaCO₃ polymorphs from synthetic soda ash industry liquid waste. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2021;168:108584. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108584>

Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. 2021;168:108584. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108584>

4. Патент № 2727048 Российская Федерация, МПК B67D 1/00. Концентраты напитков под давлением, а также устройства и способы получения напитков из указанных концентратов : № 2017121117 : заявл. 29.01.2016 : опубл. 17.07.2020 / Пеирсман Д., Вандекеркхов С., Пеллод Ж. и др. 13 с.
Patent No. 2727048, Russian Federation, IPC B67D 1/00. Pressurized beverage concentrates, as well as devices and methods for producing beverages from said concentrates: No. 2017121117; registered 29.01.2016; published 17.11.2020 / Peirman D., Vandekerckhove S., Pellod J., et al. 13 p.

5. Ражина Е.В., Смирнова Е.С. Особенности карбонизации безалкогольных напитков. В кн.: *Проблемы современной аграрной науки: материалы международной научной конференции*, г. Красноярск, 15 октября 2022 года. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет; 2020. С. 248–250. EDN: UPTAMX

Razhina E.V., Smirnova E.S. Features of carbonation of soft drinks. In: *Problems of modern agricultural science: Proceedings of the international scientific conference*, Krasnoyarsk, October 15, 2022. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2020, pp. 248–250. (In Russ.) EDN: UPTAMX

6. Пилипенко М.В., Дубина А.В., Лихавицкий В.В. Комбинирование ультразвуковой обработки и озонирования для очистки сточных вод красильных производств. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2023;(2):53–58. <https://doi.org/10.35776/VST.2023.02.07>

Pilipenko, M.V., Dubina A.V., Likhavitsky V.V. Combining ultrasonic treatment and ozonation for the treatment of wastewater from dyeing industries. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*. 2023;(2):53–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.35776/VST.2023.02.07>

7. Патент № 2727125 Российская Федерация, МПК C02F 1/36, B01J 19/10, A23L 3/30. Устройство ультразвуковой очистки сточных вод : № 2019136837 : заявл. 15.11.2019 : опубл. 20.07.2020 / Генне Д.В., Голых Р.Н., Нестеров В.А. и др. 11 с.
Patent No. 2727125, Russian Federation, IPC C02F 1/36, B01J 19/10, A23L 3/30. Ultrasonic wastewater treatment device: No. 2019136837; registered 15.11.2019; published 20.07.2020 / Genne D.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., et al. 11 p.

8. Viejo C.G., Toricco D.D., Dunshea F.R., et al. The effect of sonication on bubble size and sensory perception of carbonated water to improve quality and consumer acceptability. *Beverages*. 2019;5(3):58. <https://doi.org/10.3390/beverages5030058>

9. Патент № 2773509 Российская Федерация, МПК B01D 53/62, C25B 1/00. Способ для утилизации углекислого газа : № 2021129910 : заявл. 14.10.2021 : опубл. 06.06.2022 / Беднаржевский С.С. 9 с.
Patent No. 2773509, Russian Federation, IPC B01D 53/62, C25B 1/00. Method for recycling carbon dioxide: No. 2021129910; registered 14.10.2021; published 06.06.2022 / Bednarzhevsky S.S. 9 p.

10. Хмелёв В.Н. *Ультразвук. Принципы построения, алгоритмы и системы управления ультразвуковыми аппаратами*. Бийск: Алтайский государственный технический университет; 2021. 200 с. EDN: CKRYEH

Khmelev V.N. *Ultrasound. Principles of design, algorithms, and control systems for ultrasonic devices*. Biysk: Altai State Technical University; 2021. 200 p. (In Russ.) EDN: CKRYEH

11. Кузнецов С.Ю., Сапрыкина Я.В. Экспериментальные исследования возникновения волн-убийц при эволюции узкого спектра крутых волн. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012;5(1):52–63. EDN: OZYDVR
- Kuznetsov S.Yu., Saprykina Ya.V. Experimental investigations of freak waves arising during the evolution of narrow spectrum of steep waves. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2012;5(1):52–63. (In Russ.) EDN: OZYDVR
12. Golykh R.N., Carrat J.-B., Manyakhin I.A., et al. Influence of liquid viscosity on growth of the surface of an air bubble subjected to ultrasonic cavitation. *Physics of Fluids*. 2025;37(12):122106. <https://doi.org/10.1063/5.0300785> EDN: LYDTS
13. Shiyi Lv., Zhang R., Guo Z., et al. Viscosity reduction of heavy oil by ultrasonic. *Petroleum Chemistry*. 2020;60(9): 998–1002. <https://doi.org/10.1134/S0965544120090194> EDN: FVITHC
14. Wang C., Liu P., Wang F., et al. Experimental study on effects of CO₂ and improving oil recovery for CO₂ assisted SAGD in super-heavy-oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;165:1073–1080. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.02.058>
15. ГОСТ Р 57931-2017. Определение температуры плавления и кристаллизации методами термического анализа. Введ. 2017-11-08. М.: Стандартинформ, 2017. 14 с.
- GOST R 57931-2017. Determination of melting and crystallization temperatures by thermal analysis methods. Introduced on 08.11.2017. Moscow: Standartinform, 2017. 14 p. (In Russ.)
16. Голых Р.Н., Карра Ж.Б., Хмелев В.Н. и др. Исследование ультразвукового кавитационного воздействия на межфазную поверхность газ–жидкость при принудительной аэрации. *Прикладная механика и техническая физика*. 2024; 65(6):83–98. <https://doi.org/10.15372/PMTF202315435> EDN: UDJEEM
- Golykh R.N., Karra Zh.B., Khmelev V.N., et al. Study of ultrasonic cavitation effect on gas-liquid interphase surface under forced aeration. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2024;65(6):83–98. <https://doi.org/10.1134/S0021894424060075> EDN: RAMGVY
17. Gauthier T.P. Spatial control of cavitation in therapeutic ultrasound: Abstr. ... Diss. Master Sci., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge; 2005. 65 p.
18. Kuimov D., Minkin M., Yurov A., et al. Current state of research on the mechanism of cavitation effects in the treatment of liquid petroleum products—review and proposals for further research. *Fluids*. 2023;8(6):172. <https://doi.org/10.3390/fluids8060172>
19. Forret A., Schweitzer J.M., Gauthier T., et al. Scale up of slurry bubble reactors. *Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'IFP*. 2006;61(3):443–458. <https://doi.org/10.2516/ogst:2006044a>
20. Ma X., Huang B., Wang G., et al. Experimental investigation of conical bubble structure and acoustic flow structure in ultrasonic field. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;34:164–172. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2016.05.027>
21. Eskin D.G. Ultrasonic processing of molten and solidifying aluminium alloys: overview and outlook. *Materials Science and Technology*. 2017;33(6):636–645. <http://dx.doi.org/10.1080/02670836.2016.1162415> EDN: YUVCJN
22. Moussatov A., Lafon C., Mestas J.-L., et al. Stabilisation of cavitation zone for therapeutic applications. In: *10ème Congrès Français d'Acoustique. Lyon, France, 12–16 April 2010*. Lyon; 2010, pp. hal-00551185. Available at: <https://hal.science/hal-00551185> (accessed: 11.03.2026).
23. Geng S., Mao Z.-S., Huang Q., et al. Process intensification in pneumatically agitated slurry reactors. *Engineering*. 2021;7(3):304–325. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.03.002> EDN: KWCLXW

Об авторах

МАНЯХИН Иван Александрович, преподаватель кафедры информационных технологий, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», <https://orcid.org/0009-0000-6168-0167>, SPIN: 7278-2618, e-mail: manyaxin.ivan@bk.ru

ГОЛЫХ Роман Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий, ведущий научный сотрудник отдела научно-исследовательской работы сотрудников и преподавателей, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>, SPIN: 7832-0909, e-mail: grn@bti.secna.ru

ХМЕЛЁВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий, заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>, SPIN: 1193-1890, e-mail: vnh@bti.secna.ru

БАРСУКОВ Александр Романович, старший преподаватель кафедры информационных технологий, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», <https://orcid.org/0000-0003-3804-3340>, SPIN: 7607-2854, e-mail: barsukov.ar@bti.secna.ru

Вклад авторов

Маняхин И.А. – создание черновика рукописи, верификация данных, программное обеспечение; **Голых Р.Н.** – администрирование проекта, проведение исследования, получение финансирования; **Хмелёв В.Н.** – разработка концепции, руководство исследованием; **Барсуков А.Р.** – методология, проведение статистического анализа, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

MANYAKHIN, Ivan Aleksandrovich, Lecturer, Department of Information Technology, Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, <https://orcid.org/0009-0000-6168-0167>, SPIN: 7278-2618, e-mail: manyaxin.ivan@bk.ru

GOLYKH, Roman Nikolaevich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Information Technology, Leading Researcher, Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>, SPIN: 7832-0909, e-mail: gm@bti.secna.ru

KHMELEV, Vladimir Nikolaevich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Information Technology, Deputy Director for Research, Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>, SPIN: 1193-1890, e-mail: vnh@bti.secna.ru

BARSUKOV, Aleksandr Romanovich, Senior Lecturer, Department of Information Technology, Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, <https://orcid.org/0000-0003-3804-3340>, SPIN: 7607-2854, e-mail: barsukov.ar@bti.secna.ru

Authors' contribution

Maniakhin I.A. – writing – original draft, validation, software; **Golykh R.N.** – data curation, investigation, funding acquisition; **Khmelev V.N.** – conceptualization, supervision; **Barsukov A.R.** – methodology, formal analysis, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 24.02.2026

Поступила после рецензирования / Revised 07.04.2026

Принята к публикации / Accepted 12.05.2026